

Damir Godec

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

# Računalna simulacija procesa injekcijskoga prešanja

ISSN: 0351-1871

UDK: 678.027.7:004.94

Autorski pregled / Authors review

Primljeno / Received: 20. 3. 2006.

Prihvaćeno / Accepted: 6. 11. 2006.

## Sažetak

Suvremeni pristup razvoju kalupa za injekcijsko prešanje polimera umnogome se razlikuje od uvriježenog pristupa, koji se temelji isključivo na iskustvu i pretpostavkama konstruktora kalupa. Otpresci su sve kompliciraniji i kompleksniji te se zahtijeva njihova povišena kvaliteta. Istodobno se traži što kraći rok isporuke i što niža cijena otpreska, što zahtijeva znanstveno utemeljen, metodički pristup razvoju polimernog otpreska i kalupa za injekcijsko prešanje. Tijekom faze proračuna i dimenzioniranja elemenata kalupa potrebno je načiniti reološki, toplinski i mehanički proračun kalupa. Zbog naglog razvoja računala i odgovarajućih računalnih programa, sve više na važnosti dobivaju numeričke metode proračuna. Jedna od najčešće primjenjivanih je metoda konačnih elemenata (*FEM*), s pomoću koje je simulacijom na računalu moguće oponašati ciklus injekcijskog prešanja te provesti odgovarajuće proračune kalupa. Iako metoda konačnih elemenata daje približno točne rezultate, uz primjenu odgovarajućih podatka, simulacijom se u relativno kratkom vremenu može doći do prihvatljivih rezultata. U radu je dan primjer računalne simulacije postupka tankostjenoga injekcijskog prešanja.

## KLJUČNE RIJEČI:

injekcijsko prešanje plastomera  
računalna simulacija  
tankostjeno injekcijsko prešanje

## KEYWORDS:

computer simulation  
injection moulding of thermoplastics  
thin-wall injection moulding

## Computer simulation of injection moulding process

### Summary

The modern approach to the development of moulds for injection moulding of polymers differs a lot from the conventional approach based exclusively on the designer's experience and hypotheses. The increasingly complicated and complex mouldings and all the more frequent requirement for their improved quality, as well as shorter delivery terms, and possibly lower prices, have initiated a scientifically based, methodical approach to the development of moulded part and mould for injection moulding of polymers. In the phase of calculating and dimensioning the mould elements it is necessary to perform rheological, thermal, and mechanical calculation of the mould. Recently, thanks to the rapid development of computers and appropriate software, numerical methods have been gaining importance. One of the most frequently used numerical method is

the Finite Elements Method (*FEM*), the application of which allows the user to perform the necessary mould calculations by computer simulation. Although the Finite Elements Method gives approximately accurate results, by using the appropriate databases, the simulation can give us acceptable results within a relatively short period. The present paper gives an example of computer simulation of thin-wall injection moulding process.

## Uvod / Introduction

Trendovi na tržištu injekcijski prešanih proizvoda pokazuju: otpresci su sve kompliciraniji oblika, povišeni su zahtjevi na kvalitetu otpresaka, zahtijevaju se sve kraća vremena ciklusa injekcijskog prešanja, niže cijene kalupa i otpresaka. S druge strane, pojavljuju se novi polimerni materijali ciljanih svojstava, kao i unaprijeđeni postupci preradbe injekcijskim prešanjem (primjerice višekomponentno injekcijsko prešanje, vodno i plinsko injekcijsko prešanje itd.). Kao odgovor na te zahtjeve javlja se područje proračunavanja s pomoću računala (*CAE*), odnosno računalna simulacija postupka injekcijskog prešanja. S pomoću računalne simulacije procesa injekcijskog prešanja moguće je unaprijediti, još u prividnom (računalnom) okružju, uočiti moguće teškoće pri preradbi te definirati optimalne parametre preradbe koji rezultiraju kvalitetnim otprescima.

## Osnove računalne simulacije injekcijskog prešanja / Basics of computer simulation of injection moulding

Općenito je pri razvoju i proizvodnji otpresaka injekcijskim prešanjem potrebno poznavati četiri temeljna područja: polimerne materijale, konstruiranje otpresaka, konstruiranje kalupa i proces injekcijskog prešanja (namještanje parametara). Svako od navedenih područja podjednako je važno, a promjene u bilo kojem dijelu uzrokuju promjene u ostalim segmentima. Primjerice, smanjenje debljine stijenke otpreska može nametnuti izbor novoga materijala bolje tecljivosti, prilagodbu konstrukcije kalupa (gnijezda i žiga), kao i povišenje tlaka ubrizgavanja radi osiguranja popunjavanja kalupne šupljine.<sup>1</sup>

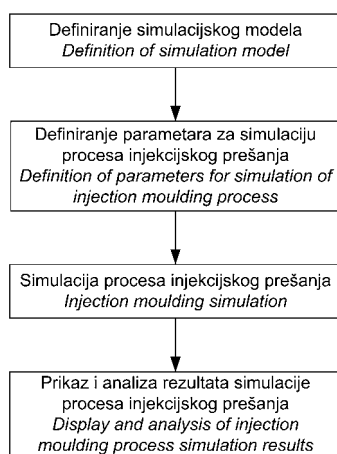
Suvremeni trendovi na tržištu pred konstruktore otpresaka, kalupa, alatničare i prerađivače postavljaju sve strože zahtjeve. Ponajprije se očekuje skraćanje vremena razvoja otpreska, razvoja i izradbe kalupa, zahtijeva se viša kvaliteta uz niže cijene, javlja se potreba za razvojem otpresaka ekstremnih debljina stijenke (npr. tankostjeni otpresci). Istodobno se razvijaju i uspješno primjenjuju unaprijeđeni procesi injekcijskog prešanja, trajno se razvijaju novi polimerni materijali za injekcijsko prešanje itd.<sup>2,3-6</sup>

Kao mogući odgovor na te zahtjeve javlja se područje proračunavanja s pomoću računala, tj. računalna simulacija procesa injekcijskog prešanja. S pomoću računalne simulacije moguće je unaprijediti predvidjeti teškoće u preradbi te ih na vrijeme otkloniti još u prividnom (virtualnom - računalnom) okružju, što je mnogo brže i ekonomičnije nego u stvarnom okružju, primjerice na već izrađenom kalupu<sup>1</sup>. Uporabom tih programa moguće je analizirati utjecaj geometrije otpreska, svojstava polimernog materijala te parametara kalupa i procesa injekcijskog prešanja na svojstva otpreska. Isprva se čini kako izvođenje

računalnih simulacija i optimiranja odabranog materijala, konstrukcije otpreska, konstrukcije kalupa i parametara injekcijskog prešanja povišuje troškove razvoja, no ti se troškovi dugoročno bitno snižavaju. Izbjegavaju se greške u konstrukcijama otpreska i kalupa koje je poslije vrlo skupo i dugotrajno ispravljati, kao i greške u namještanju parametara procesa injekcijskoga prešanja.<sup>1,7-11</sup>

Razvoj računala i odgovarajućih računalnih programa doveo je do sve češće uporabe ponajprije numeričkih metoda pri pokušajima računalnog oponašanja procesa injekcijskog prešanja. Pri tome se numerički proračun kalupa svodi na simulaciju faze punjenja kalupne šupljine i stlačivanja (e. *fill analysis*), fazu djelovanja naknadnog tlaka (e. *pack analysis*), fazu temperiranja (e. *cool analysis*) te proračun (simulaciju) deformacija otpreska u kalupnoj šupljini i nakon vađenja iz kalupne šupljine (e. *warpage analysis*).<sup>12,13</sup>

Kako bi simulacija procesa injekcijskog prešanja plastomernih taljevina bila uspješna, potrebno je provesti korake prikazane slikom 1.

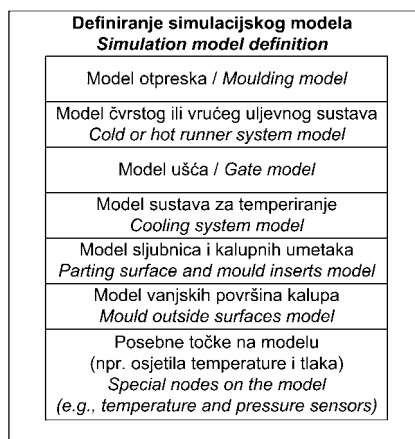


SLIKA 1. Koraci pri simuliranju injekcijskog prešanja plastomera<sup>3,14</sup>  
FIGURE 1. Injection moulding computer simulation steps

### Definiranje simulacijskog modela / Definition of the simulation model

Prije izvođenja analize potrebno je definirati precizan simulacijski model kako bi rezultati provedenih analiza bili što točniji i precizniji. Zadatak se svodi na definiranje mreže konačnih elemenata otpreska, odnosno kalupne šupljine i elemenata kalupa. Na slici 2 shematski je prikazana ta faza simuliranja.<sup>3,14</sup>

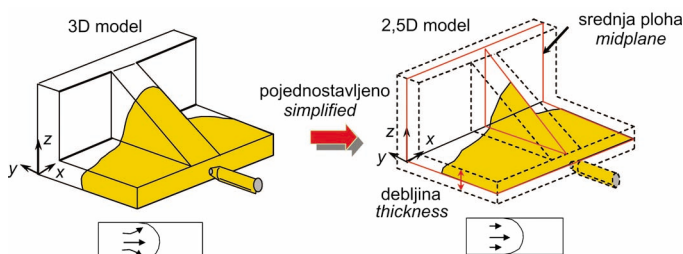
Za definiranje konstrukcije simulacijskog modela potrebno je učiniti sljedeće korake:<sup>3,14</sup>



SLIKA 2. Faza definiranja simulacijskog modela<sup>3,12,14</sup>  
FIGURE 2. Simulation model definition phase

- konstruiranje geometrije simulacijskog modela
- definiranje mreže konačnih elemenata na modelima
- definiranje posebnih točaka na modelu (npr. osjetila tlaka i temperature)
- provjera mreže.

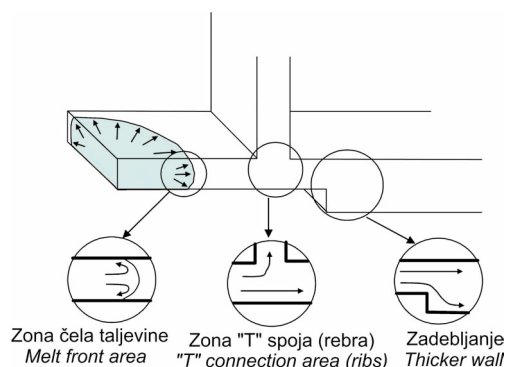
Pri definiranju simulacijskog modela potrebno je voditi računa o tome hoće li se rabiti plošna mreža konačnih elemenata (2,5D model) ili trodimenzionalna mreža (3D model) konačnih elemenata (slika 3).<sup>12</sup>



SLIKA 3. Razlika između plošne i obujamne analize punjenja kalupne šupljine<sup>12</sup>  
FIGURE 3. The difference between shell and volume cavity filling analysis

Pri izboru simulacijske metode, tj. generiranja pojedinoga simulacijskog modela, treba biti svjestan prednosti i nedostataka pojedinog pristupa. Prednosti 2,5D simulacije očituju se u brzini analize (manje zahtjevno za računalo) te robusnosti samog procesa proračuna, što se očituje u manjoj mogućnosti nastanka pogreške tijekom simulacije. S druge strane, izrada srednje plohe predstavlja najveću teškoću pri 2,5D analizi te zahtijeva i više od 80 % ukupnog vremena potrebnog za simulaciju. Kako je za neke geometrijske detalje vrlo teško identificirati srednju plohu, vrlo se često geometrija otpreska pojednostavljuje, što predstavlja izvor netočnosti u rezultatima simulacije. Kao dopunski izvor netočnosti javlja se i zanemarivanje pojava vezanih uz treću dimenziju u kalupnoj šupljini (posebice pri fazi punjenja kalupne šupljine - slika 4). Dopunski je nedostatak 2,5D simulacije teškoća u integriranju s rješavateljima (e. *solver*) koji omogućuju proračune naprezanja u otpresku ili elementu kalupne šupljine.<sup>7,8,12</sup>

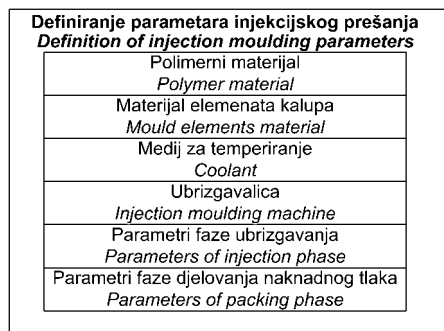
Pri uporabi 3D simulacije izbjegavaju se greške vezane uz generiranje srednje plohe, omogućena je analiza stvarnih pojava pri 3D tečenju taljevine, a osigurani su i točniji podatci o mikrostrukтури (efekti izvora tečenja, orijentacija vlakana, orijentacija molekula, stezanje i vitoperenje). Međutim, 3D analiza zahtijeva moćnija računala i dulja vremena analize, a analiza grešaka na mreži mnogo je zahtjevnija negoli pri 2,5D simulaciji.<sup>12</sup>



SLIKA 4. Pojave u smjeru treće osi pri tečenju taljevine<sup>7,12,15</sup>  
FIGURE 4. Occurrences in melt front advancement direction

## Definiranje parametara injekcijskog prešanja / The definition of injection moulding processing parameters

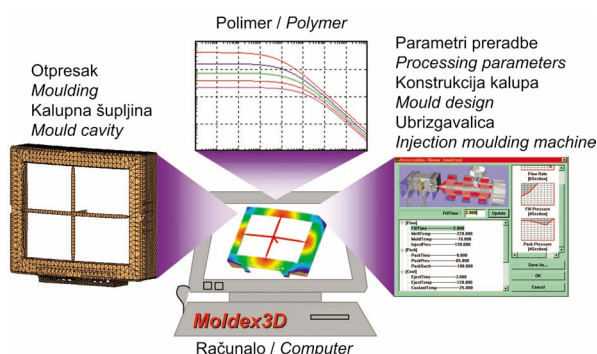
Prije provođenja bilo koje od numeričkih analiza nužno je definirati parametre injekcijskog prešanja (slika 5), koji uz simulacijski model predstavljaju ulazne podatke za simulaciju. Stoga je bitno te parametre odrediti što je moguće vjernije stvarnom stanju u sustavu za injekcijsko prešanje.



SLIKA 5. Faza definiranja parametara injekcijskog prešanja<sup>12</sup>  
FIGURE 5. Injection moulding parameters definition phase

Tijekom razvoja polimernog otpreska izabire se optimalan materijal otpreska čija su preradbena svojstva ključna za dobivanje odgovarajućih rezultata simulacije. Računalni programi za simulaciju injekcijskog prešanja uglavnom sadržavaju podatke s većim brojem polimernih materijala, tako da je uključivanje ovih ulaznih parametara vrlo jednostavno, izborom jednoga od raspoloživih materijala. Ako se određeni polimerni materijal ne nalazi u podatkaru, u većini programa moguće je definirati vlastitu podatkaru s potrebnim materijalima. Već pri samom izboru polimernog materijala automatski se definiraju mogući rasponi određenih parametara injekcijskog prešanja. Primjerice, svi proizvođači polimernih materijala definiraju poželjne raspone parametara preradbe, kao što su temperatura taljevine, temperatura stijenke kalupne šupljine te temperatura postojanosti oblika (temperatura očvršćivanja).<sup>3,10,12,13</sup>

Pri određivanju ulaznih parametara za simulaciju također je potrebno definirati vrstu kalupnog materijala, vrstu i parametre medija za temperiranje (vrsta, protok, temperatura) te ubrizgavalicu na kojoj će se odvijati buduća preradba (slika 6). Pri tome je moguće uz temeljne karakteristike ubrizgavalice definirati i profile brzine ubrizgavanja, profile tlaka ubrizgavanja i naknadnog tlaka.<sup>12,13</sup>

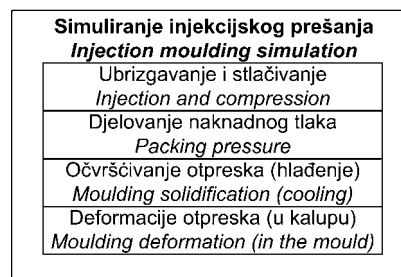


SLIKA 6. Ulazni parametri za računalnu simulaciju injekcijskog prešanja<sup>12</sup>  
FIGURE 6. The input parameters for injection moulding computer simulation

## Simuliranje procesa injekcijskog prešanja / The simulation of injection moulding process

U većini računalnih programa simuliranje procesa injekcijskog prešanja podijeljeno je u četiri koraka (slika 7). Tijekom simuliranja faze punjenja kalupne šupljine i stlačivanja taljevine analizira se

tečenje plastomerne taljevine kroz uljevnu i kalupnu(e) šupljinu(e). Ta faza predstavlja reološki proračun kalupa u kojem se određuju parametri potrebni za uspješno i potpuno popunjavanje kalupne šupljine. Pri tome je moguće definirati postotak popunjenosti kalupne šupljine prije preklapanja na naknadni tlak. Najčešće se taj udio kreće od 95 do 100 %. Pri injekcijskom prešanju tankostjenih otpresaka najčešće se u fazi punjenja kalupna šupljina ispuni 100 %.<sup>10,12,13</sup>



SLIKA 7. Faze simuliranja injekcijskog prešanja<sup>12</sup>  
FIGURE 7. Injection moulding simulation phases

Slijedi analiza faze djelovanja naknadnog tlaka. Tijekom te faze analiziraju se zbivanja u kalupnoj šupljini pri dodavanju materijala u kalupnu šupljinu radi nadoknade stezanja taljevine. Na kraju faze djelovanja naknadnog tlaka kalupna šupljina treba biti 100 % popunjena.<sup>10,12,13</sup>

Analiza očvršćivanja otpreska svodi se na toplinski proračun kalupa. Pri tome se određuje vrijeme hlađenja otpreska te je moguće proračunati optimalne parametre sustava za temperiranje kalupa. Također je moguće dobiti uvid u temperaturno polje kalupa koje umnogome određuje uporabna svojstva otpreska, kao i trošak energije potrebne za temperiranje kalupa.<sup>10,12,13</sup>

Utjecaj i posljedice prethodnih faza ciklusa injekcijskog prešanja na svojstva otpreska moguće je analizirati proračunom deformacija otpreska u kalupu. Pri ubrizgavanju plastomerne taljevine u kalupnu šupljinu, pri djelovanju naknadnog tlaka i pri očvršćivanju otpreska u kalupu, plastomerna je taljevina u kalupnoj šupljini pod utjecajem temperatura, tlakova, smičnih brzina i smičnih naprezanja koji se mjesno mogu bitno razlikovati. To dovodi do različitih mjesnih uvjeta u kalupnoj šupljini, što rezultira deformacijama otpreska, najčešće u obliku vitoperenja. Nadalje, ako otpresak nema jednoliku debljinu stijenke, odnosno ako temperiranje kalupa nije optimizirano, dolazi do nejednolikog stezanja taljevine u kalupnoj šupljini i dodatnog vitoperenja otpreska.<sup>10,12,13</sup>

Navedene proračune moguće je većinom računalnih programa provoditi odvojeno. Međutim, ako se želi provesti cijeli proračun, najčešće se provode analiza punjenja, zatim očvršćivanja otpreska pa ponovno punjenja, djelovanja naknadnog tlaka i, konačno, deformacija otpreska u kalupu. Razlog je takvoj kombinaciji proračuna to što se pri prvoj analizi punjenja ulazi samo s pojedinačnim vrijednostima ulaznih parametara. Nakon analize punjenja, a zatim i očvršćivanja, raspolaže se čitavim poljima parametara koji se zatim rabe u preostalim fazama analize. Time se postižu točniji rezultati.<sup>12,13</sup>

## Analiza i interpretacija rezultata računalne simulacije / Analysis and interpretation of computer simulation results

Pri analizi procesa injekcijskog prešanja s pomoću računala odvojeno se promatraju četiri faze ciklusa: punjenje kalupne šupljine, djelovanje naknadnog tlaka, očvršćivanje otpreska u kalupu i deformacije otpreska u kalupu.

Pri analizi punjenja kalupne šupljine razmatra se uglavnom nekoliko pojava, pri čemu se analizira njihov utjecaj na:<sup>10,12,13</sup>

- popunjenost kalupne šupljine
- potreban tlak ubrizgavanja
- postojanje mjesno većih otpora tečenju
- pojavu uključina zraka u otpresku
- pojavu linija spajanja na otpresku pri višestrukim ušćima, uravnoteženje tečenja taljevine kroz kalupnu šuplinu
- pri kalupima s više kalupnih šupljina, uravnoteženje uljevnog sustava kako bi se za svaku kalupnu šuplinu postigli ujednačeni uvjeti punjenja.

Važniji rezultati koje je potrebno pravilno interpretirati pri analizi faze punjenja kalupne šupljine jesu temperatura otpreska, razdioba tlaka, smičnih naprezanja i smičnih brzina u kalupnoj šupljini.

Pri analizi rezultata simulacije faze djelovanja naknadnog tlaka potrebno je voditi računa o napredovanju čela taljevine tijekom te faze. Čelo taljevine katkad ne uspijeva potpuno popuniti kalupnu šuplinu do završetka djelovanja naknadnog tlaka. To upućuje na prevelik otpor tečenju. Kao mjere za sprječavanje nepotpunog popunjavanja kalupne šupljine mogu se razmatrati povećanje debljine stijenke otpreska, broja ušća, izmjera ušća i optimiranje položaja ušća itd. Ako se uočavaju zone u kojima naknadni tlak presnažno djeluje, moguće je očekivati prekomjerno stlačivanje molekula (e. *over-packing*) i nepovoljna svojstva otpreska. Tu je razliku moguće uočiti usporedbom gustoća u tim zonama prije i nakon djelovanja naknadnog tlaka. Najčešće je uzrok toj pojavi geometrija otpreska i nepovoljan položaj ušća.<sup>12</sup>

Pri analizi faze djelovanja naknadnog tlaka posebnu pozornost valja obratiti na razdiobu tlaka u kalupnoj šupljini te razdiobu stezanja otpreska. Za analizu razdiobe tlaka u kalupnoj šupljini tijekom faze djelovanja naknadnog tlaka vrijede naznake kao i tijekom faze punjenja kalupne šupljine. Naknadni tlak, kao i temperatura taljevine, najvažniji su parametri pri određivanju specifičnog obujma i gustoće plastomernih otpresaka.<sup>12</sup>

Cilj analize faze očvršćivanja (hlađenja) otpreska u prvom je redu određivanje vremena hlađenja otpreska i vremena ciklusa injekcijskog prešanja, optimiranje sustava za temperiranje te definiranje temperatura stijenke kalupne šupljine potrebnih za proračun vitoperenja. Nejednoliko hlađenje jedan je od najčešćih uzroka pojave vitoperenja otpreska. Pri analizi faze očvršćivanja otpreska potrebno je posebice provjeriti je li otpresak ohlađen u svim zonama ispod temperature postojanosti oblika, kako bi se mogao sigurno izvaditi iz kalupne šupljine. Također je potrebno provjeriti prati li razdioba temperature u otpresku i razdiobu debljine stijenke. Debljoj stijenci te na rebima potrebno je dulje vrijeme hlađenja. Takva mjesta obično su uzrok pojavama vitoperenja, uvijanja i usahlina.<sup>12,16</sup>

Pri analizi hlađenja otpreska razlikuju se pomična i nepomična strana kalupa radi utvrđivanja toplinskih uvjeta u oba dijela kalupa. Na temelju tih uvjeta moguće je i odrediti učinkovitost kanala za temperiranje u oba dijela kalupa. Izrazito nejednoliki toplinski uvjeti u obje strane uzrokovat će pojavu vitoperenja. Stoga je potrebno provjeriti pojavu mjesta gdje se akumulira toplinska energija, što može biti povezano s lošom efikasnošću kanala za temperiranje, debljinom stijenke otpreska ili mjesnim zagrijavanjem taljevine.

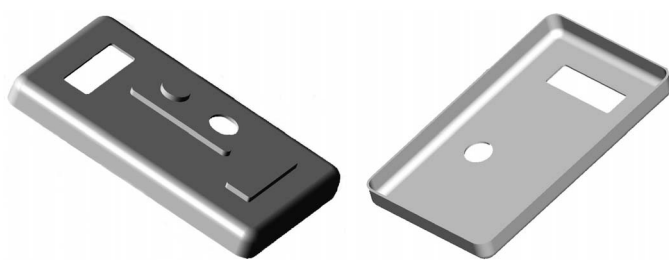
Tijekom analize faze deformiranja otpreska u kalupu razmatraju se tri slučaja: deformiranje tijekom faze punjenja i djelovanja naknadnog tlaka, deformiranje tijekom procesa hlađenja otpreska te deformiranje nakon vađenja otpreska iz kalupne šupljine. Pri tome je moguće navesti nekoliko najutjecajnijih čimbenika na deformiranje otpreska: prerađivani materijal, geometrija otpreska, konstrukcija kalupa, brzina ubrizgavanja, naknadni tlak, temperatura taljevine i temperatura stijenke kalupne šupljine.

## Simulacija i pokusi / Simulation and experiments

Trajno smanjenje debljine stijenke otpresaka uzrokuje potrebu za postizanjem ekstremnih parametara procesa injekcijskog prešanja koji često moraju biti u vrlo uskim granicama kako bi se omogućila izrada kvalitetnih tankostjenih otpresaka. Zbog teškoća koje se javljaju pri tankostjenom injekcijskom prešanju, potrebno je načiniti opsežna ispitivanja koja će omogućiti uspješan razvoj i izradu tankostjenih otpresaka. Dio nastojanja trebao bi biti usmjeren k istraživanju primjenjivosti CAE analize postupka tankostjenoga injekcijskog prešanja radi predviđanja parametara preradbe i svojstava otpreska. Pri klasičnom postupku injekcijskog prešanja računalna simulacija omogućuje dobivanje zadovoljavajuće točnih rezultata, a oni uvelike ovise o podatcima o plastomernim materijalima. Specifičnosti tankostjenoga injekcijskog prešanja uvelike utječu na postizanje izrazito neravnotežnog stanja plastomernog materijala, koje se bitno razlikuje od stanja materijala u laboratorijskim uvjetima pri određivanju svojstava materijala. Stoga je potrebno utvrditi primjenjivost računalne simulacije za analizu tankostjenoga injekcijskog prešanja.

U radu je s pomoću računalnog programa načinjena simulacija postupka injekcijskog prešanja tankostjenog otpreska, a rezultati simulacije uspoređeni su s rezultatima pokusa u stvarnim uvjetima. Usporedba dobivenih rezultata omogućila je zaključivanje o primjenjivosti računalne simulacije za postupak tankostjenoga injekcijskog prešanja.

Za potrebe istraživanja razvijen je specifičan tankostjeni otpresak debljine stijenke 1 mm (slika 8). Istraživanje je provedeno s pomoću prototipnog (hibridnog) kalupa u kojem su elementi koji oblikuju kalupnu šuplinu (žig i gnijezdo) načinjeni s pomoću postupka selektivnoga laserskog srašćivanja (e. *Selective Laser Sintering* – SLS) od materijala *Laser Form A6* tvrtke *3D Systems*. Pri računalnoj simulaciji tankostjenoga injekcijskog prešanja rabljen je program – *Moldex 3D R7.1* tvrtke *CoreTech*. Materijal od kojega je načinjen eksperimentalni otpresak bio je polipropilen (PP) tvrtke *Borealis* oznake *HJ325MO*. Pokusi su provedeni na ubrizgavalici tvrtke *ENGEL*, oznake *Victory VC 330/60*.



SLIKA 8. Tankostjeni otpresak<sup>17</sup>

FIGURE 8. Thin-wall moulding

## Analiza rezultata simulacije i pokusa / Simulation and experimental results analysis

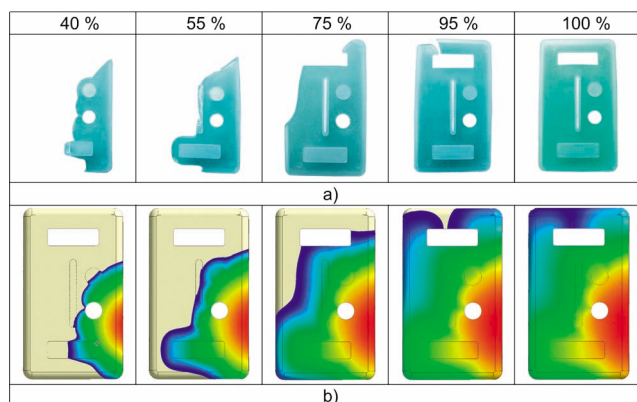
Tablica 1 prikazuje važnije rezultate dobivene nakon provedbe simulacije tankostjenoga injekcijskog prešanja i potrebnih pokusa.

## Analiza faze ubrizgavanja / Analysis of injection phase

Pri analizi faze ubrizgavanja najvažnije informacije odnose se na popunjenost kalupne šupljine te potreban tlak i vrijeme ubrizgavanja. Slika 9 prikazuje rezultate analize faze punjenja kalupne šupljine.



ne dobivene s pomoću računalne simulacije te u stvarnom procesu. Na temelju slike 9 moguće je zaključiti kako računalna simulacija rezultira zadovoljavajućim predviđanjem napredovanja čela taljevine. Istodobno je moguće zaključiti kako proces rezultira potpunim otprescima u oba slučaja.



SLIKA 9. Faza ubrizgavanja: a - stvarni proces, b - Moldex 3D simulacija<sup>17,18</sup>

FIGURE 9. Injection phase: a - real process, b - Moldex 3D simulation

Slika 10 prikazuje rezultate najvažnijih parametara injekcijskog prešanja pri fazi punjenja kalupne šupljine (vrijeme ubrizgavanja i tlak ubrizgavanja). Rezultati simulacije za oba parametra podudaraju se s rezultatima dobivenim u stvarnom procesu tankostjenoga injekcijskog prešanja.

#### Analiza faze djelovanja naknadnog tlaka / Analysis of packing phase

Računalna simulacija faze djelovanja naknadnog tlaka omogućuje uvid u dva glavna rezultata: masu (gustoću) otpreska i stezanje otpreska (slika 11). Usporedba rezultata gustoće, odnosno mase otpresaka, dobivenih računalnom simulacijom i u stvarnom procesu upućuju na mala odstupanja. U slučaju stezanja nije bilo moguće usporediti rezultate dobivene s pomoću računalne simulacije s rezultatima iz pokusa.

TABLICA 1. Rezultati simulacije i pokusa tankostjenoga injekcijskog prešanja<sup>17,18</sup>

TABLE 1. Results of simulation and an experiment of thin-wall injection moulding

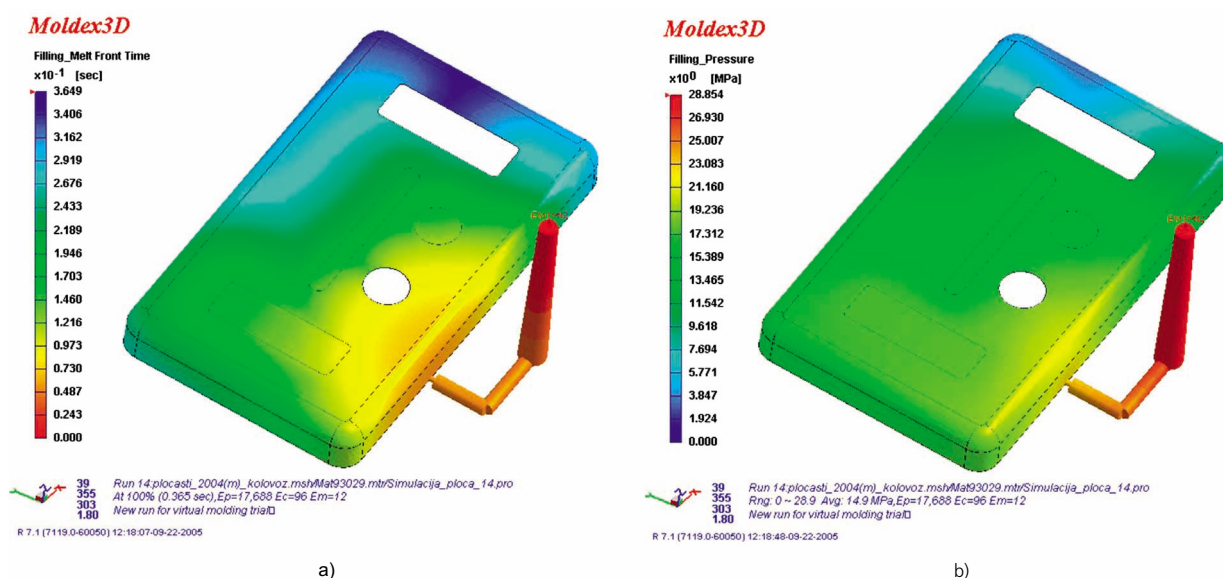
Parametar preradbe - svojstvo otpreska / Processing parameter - moulding property	Moldex 3D	Pokus / Experiment
Vrijeme ubrizgavanja / Injection time	0,365 s	0,4 s
Tlak ubrizgavanja / Injection pressure	289 bar	280 - 290 bar
Maksimalno stezanje otpreska / Maximum part volumetric shrinkage	12,8 %	-
Vrijeme hlađenja otpreska / Part cooling time	27,3 s	28,3 s
Temperatura stijenke kalupne šupljine / Mould cavity wall temperature	34,5 °C	38,4 °C

#### Analiza faze očvršćivanja otpreska / Analysis of cooling phase

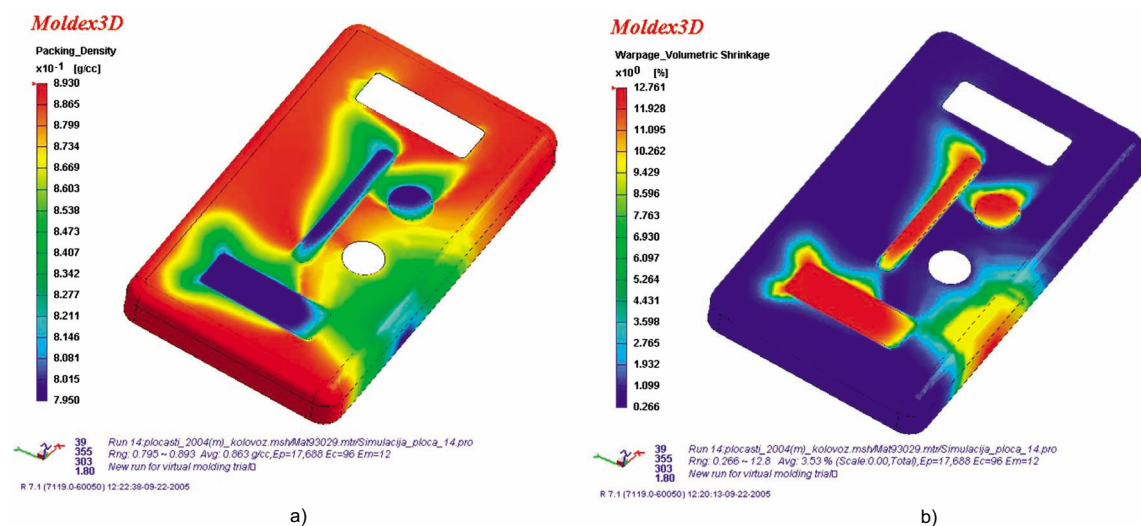
Temeljni je zadatak analize faze očvršćivanja otpreska odrediti vrijeme hlađenja otpreska. Pri tome se najčešće primjenjuju dva pristupa: analitički i numerički. U slučaju analitičkog proračuna vremena hlađenja otpreska rabi se opća jednadžba hlađenja otpreska<sup>16</sup>:

$$t_h = \frac{s_o^2}{K_o \cdot a_{ef} \cdot \pi^2} \cdot \ln \left[ K_U \cdot \frac{T_T - T_K}{T_{PO} - T_K} \right] = 28,3 s \quad (1)$$

gdje su:  $t_h$  – vrijeme hlađenja otpreska,  $s_o$  – karakteristična izmjera otpreska (debljina stijenke),  $K_o$  – koeficijent oblika otpreska,  $a_{ef}$  – efektivna toplinska difuzivnost,  $K_U$  – koeficijent unutrašnjosti otpreska,  $T_T$  – temperatura taljevine,  $T_K$  – temperatura stijenke kalupne šupljine,  $T_{PO}$  – temperatura postojanosti oblika.

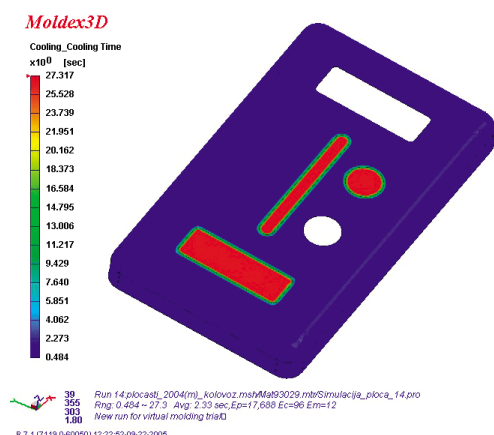


SLIKA 10. Rezultati faze ubrizgavanja: a - vrijeme ubrizgavanja, b - tlak ubrizgavanja na kraju faze punjenja kalupne šupljine<sup>17,18</sup>



SLIKA 11. Faza djelovanja naknadnog tlaka: a - gustoća otpreska, b - stezanje otpreska<sup>17,18</sup>  
FIGURE 11. Packing phase: a - moulded part density, b - moulded part shrinkage

Rezultate numeričkog proračuna vremena hlađenja otpreska prikazuje slika 12.



SLIKA 12. Rezultat numeričkog proračuna vremena hlađenja otpreska<sup>17,18</sup>

FIGURE 12. Result of numerical moulding cooling time calculation

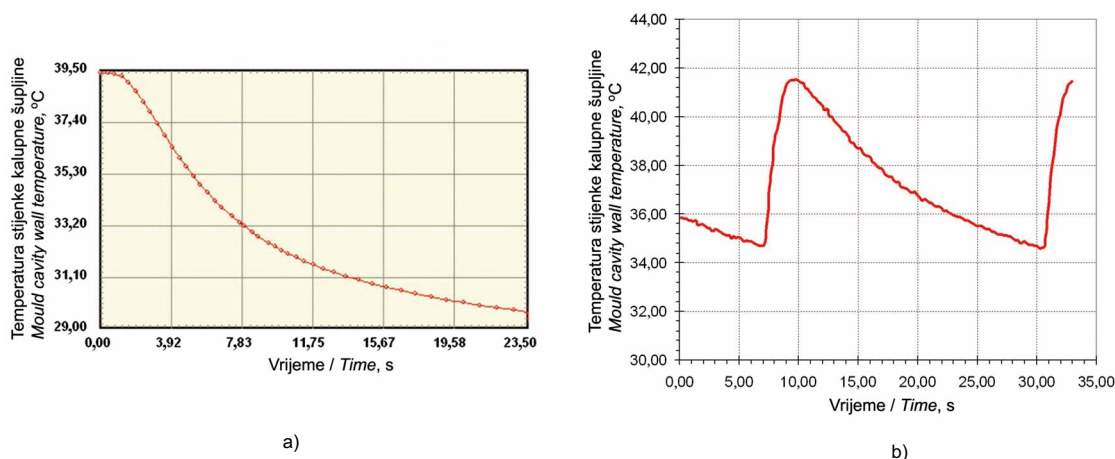
Analiza faze očvršćivanja otpreska također omogućuje uvid u temperaturno polje kalupa, odnosno u tijek temperature stijenke kalupne šupljine. Temperatura stijenke kalupne šupljine jedan je od najvažnijih parametara injekcijskog prešanja, koji utječe na mnoga

svojstva gotovog otpreska. Pri računalnoj simulaciji omogućeno je pozicioniranje posebne točke na mrežu konačnih elemenata koja oponaša osjetilo temperature u kalupu. S pomoću te točke moguće je analizirati razdiobu temperature stijenke kalupne šupljine tijekom ciklusa injekcijskog prešanja. Na slici 13 prikazana su temperaturna polja stijenke kalupne šupljine dobivena računalnom simulacijom i mjerenjem u eksperimentalnom kalupu.

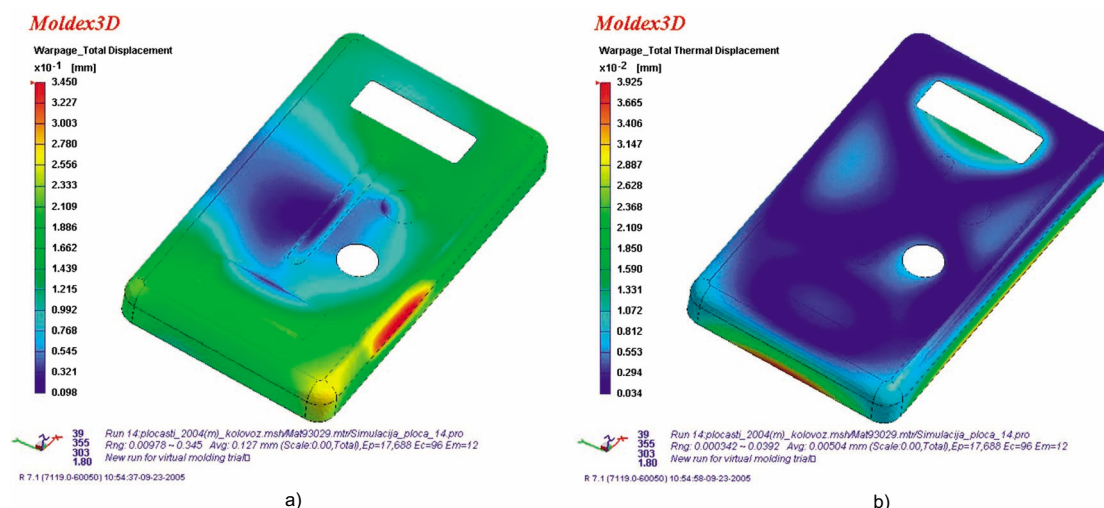
Na temelju slike 13 moguće je zaključiti kako računalna simulacija rezultira nešto nižim temperaturnim poljem u usporedbi sa stvarnim temperaturnim poljem stijenke kalupne šupljine.

### Analiza deformacija otpreska / Analysis of moulded part deformation

Tijekom ciklusa injekcijskog prešanja u kalupnoj šupljini, a posebice nakon vađenja otpreska iz kalupa, otpresak se deformira. Pri tome se razlikuju dva izvora deformacija: stezanje i vitoperenje. Do stezanja dolazi zbog hlađenja taljevine u kalupnoj šupljini. S druge strane, do vitoperenja dolazi zbog nejednolikog stezanja u pojedinim područjima otpreska, zbog nejednolikih uvjeta očvršćivanja (hlađenja) otpreska u kalupnoj šupljini te zbog naknadne kristalizacije nakon vađenja otpreska iz kalupa pri preradbi kristalastih plastomera. Slika 14 prikazuje rezultate analize vitoperenja otpreska nastalog zbog nejednolikog stezanja otpreska te zbog različitih toplinskih uvjeta u kalupnoj šupljini.



SLIKA 13. Temperaturno polje stijenke kalupne šupljine: a - simulacija, b - mjereno<sup>17,18</sup>  
FIGURE 13. Mould cavity wall temperature field: a - simulation, b - measured



SLIKA 14. Vitoperenje otpreska: a - deformacija (stezanje), b - toplinska deformacija<sup>17,18</sup>  
 FIGURE 14. Moulded part warpage: a - displacement (shrinkage), b - thermal displacement

Radi dobivanja informacije o deformacijama otpreska potrebno je u obzir uzeti oba rezultata prikazana na slici 14. U sklopu pokusa mjerene su deformacije otpreska u dvije glavne osi, a ti rezultati uspoređivani su s rezultatima dobivenima simulacijom. Rezultati deformacija otpreska prikazani u tablici 1 bitno se razlikuju u ta dva slučaja. Kao temeljni razlog te razlike moguće je navesti naknadnu kristalizaciju otpresaka od PP-a nakon vađenja iz kalupne šupljine i pripadajuću deformaciju otpreska koju nije moguće predvidjeti s pomoću računalne simulacije. Stoga su vrijednosti deformacija otpresaka dobivene iz pokusa bitno više.

## Zaključak / Conclusion

U radu su dane osnovne faze i smjernice za uporabu računalne simulacije pri oponašanju injekcijskog prešanja polimera. U praktičnom dijelu rada analizirana je uporabljivost računalnog programa *Moldex 3D* na slučaju tankostjenog otpreska načinjenoga u prototipnom (hibridnom) kalupu. Načelno, uporaba programa *Moldex 3D* rezultira prihvatljivim rezultatima pri analizi faze punjenja kalupne šupljine i djelovanja naknadnog tlaka. Također se pri analizi faze očvršćivanja otpreska u kalupu dobivaju rezultati približni onima dobivenima provjerenom općom jednakžbom hlađenja otpreska. Najveće razlike uočene su pri analizi deformacije otpreska. Opći je zaključak kako je računalni program *Moldex 3D* primjenjiv za računalnu simulaciju tankostjenoga injekcijskog prešanja, ali uz određena ograničenja. Pri tome valja napomenuti kako se u pokusima rabio hibridni kalup u kojem su žig i gnijezdo načinjeni postupkom brze izradbe kalupa (SLS), dok je ostatak kalupa načinjen od klasičnoga kalupnog materijala (čelika). U sklopu provedenih simulacija kao materijal kalupnih elemenata uzet je samo materijal *Laser Form A6*. Takvo pojednostavnjenje simulacijskog modela svakako je izvor odstupanja u dobivenim rezultatima. Kao dopunski izvor odstupanja u rezultatima simulacije moguće je navesti i nemogućnost unošenja podatka o hrapavosti stijenke kalupne šupljine, koja je u slučaju hibridnog kalupa nešto viša negoli u slučaju klasičnog kalupa.

## Zahvala / Acknowledgment

Rad je dio istraživanja koje financira Ministarstvo znanosti i tehnologije Republike Hrvatske u sklopu projekta Unaprijeđeni postupci

proizvodnje polimernih tvorevina. Autor zahvaljuje Ministarstvu na novčanoj potpori projektu. Autor također zahvaljuje tvrtkama 3D Systems, Borealis AS predstavništvo u RH i Drenoplast, koje su omogućile provedbu istraživanja.

## LITERATURA / REFERENCES

- Travaglini, V.: *Optimizing part and mold design using C.A.E. technology*, ANTEC '98, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26.-30. 4. 1998., 893-897.
- Čatić, I., Johannaber, F.: *Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004.
- Godec, D.: *Doprinos sustavnom razvoju kalupa za injekcijsko prešanje plastomera*, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2000.
- Johannaber, F.: *Unaprijeđeni postupci injekcijskog prešanja na razmjeri dva-tisućljeća II*, Polimeri, 22(2001)2, 45-54.
- Malloy, R. A.: *Plastic Part Design for Injection Molding*, Carl Hanser Verlag, München, 1994.
- Griffiths, A.: *Moulding the future*, Materials World, 6(1998)1, 12-14.
- Godec, D., Čatić, I., Perković, D.: *Simulation Application in Mould Development for Injection Moulding of Polymers*, UPS'97, Proceedings, Sveučilište u Mostaru, Strojarski fakultet, Mostar, 1997., 93-98.
- Šercer, M., Godec, D.: *Računalna simulacija punjenja kalupne šupljine*, IV. simpozij Modeliranje u znanosti, tehnici i društvu, Zbornik radova, Akademija tehničkih znanosti i Hrvatsko društvo za sustave, Rijeka, 26.-27. 6. 2000., 209-215.
- Godec, D., Rot, M., Čatić, I.: *Comparison Between Analytical and Numerical Mould Calculation for Injection Moulding of Thermoplastics*, ICIT 2001, Conference Proceedings, TECOS, Rogaška Slatina, 22. - 26. 4. 2001., 163-168.
- Beaumont, J. P., Nagel, R., Sherman, R.: *Successful Injection Molding*, Carl Hanser Verlag, München, 2002.
- Mahishi, M.: *Material Characterization for Thin Wall Molding Simulation*, ANTEC '98, Conference Proceedings, Society of Plastics Engineers, Atlanta, 26. - 30. 4. 1998., 893-897.
- N. N.: *Upute za uporabu računalnog programa Moldex 3D*, CoreTech Systems, 2004.
- N. N.: *Upute za uporabu računalnog programa Moldflow* Plastics Inside, Moldflow, 2004.
- Kruhek, H.: *Diplomski rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1999.
- Michaeli, W., Findeisen, H., Gossel, Th., Klein, Th.: *2,5 und 3D im Vergleich - Spritzgießsimulationen auf dem Prüfstand*, Kunststoffe, 87(1997)4, 462-466.
- Čatić, I.: *Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera*, Društvo plastičara i gumaraca, Zagreb, 1985.
- Godec, D.: *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska*, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- Godec, D., Rot, M., Šercer, M.: *Analysis of thin-wall injection moulding process*, ICIT 2005, Conference Proceedings, TECOS, Velenje, Slovenia 12. - 14. 4. 2005., 125-128.

## DOPISIVANJE / CORRESPONDENCE

Dr. sc. Damir Godec  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Fakultet strojarstva i brodogradnje / Katedra za preradu polimera  
 Ivana Lučića 5, HR-10 000 Zagreb, Hrvatska / Croatia  
 Tel.: +385-1-61-68-192, faks: 385-1-61-50-081, E-mail: damir.godec@fsb.hr